49

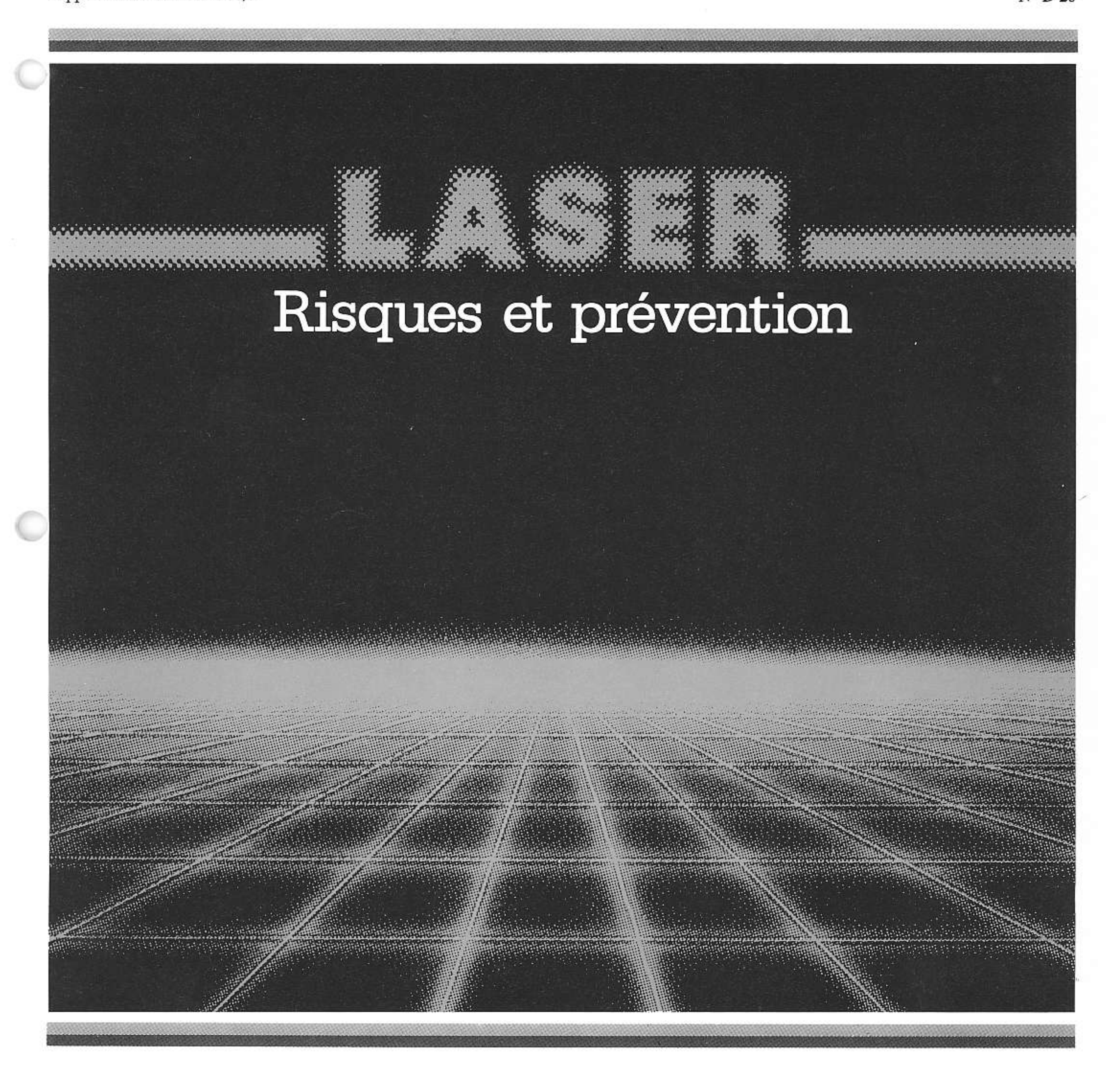
Professeur J. Malchaire
Unité Hygiène et Physiologie du Travail
Université Catholique de Louvain

DOSSIER

Laser: principe d'émission ● Gamme de rayonnement laser ● Applications ● Propagation du faisceau Risques ● Exposition maximale permise (EMP) ● Recherche de la densité optique nécessaire des écrans de protection oculaire ● Distance nominale de risques oculaire DNRO ● Classes d'émission ● Prescriptions de fabrication ● Prescription pour l'utilisateur ● Surveillance médicale ● Réglementation Belge ●

Supplément à Promosafe 88/5

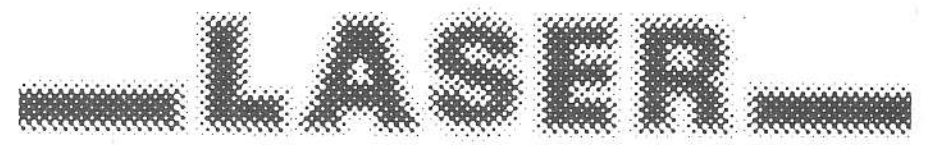
N° D 20



DOSSIER

Supplément à Promosafe 88/5

N° D 20

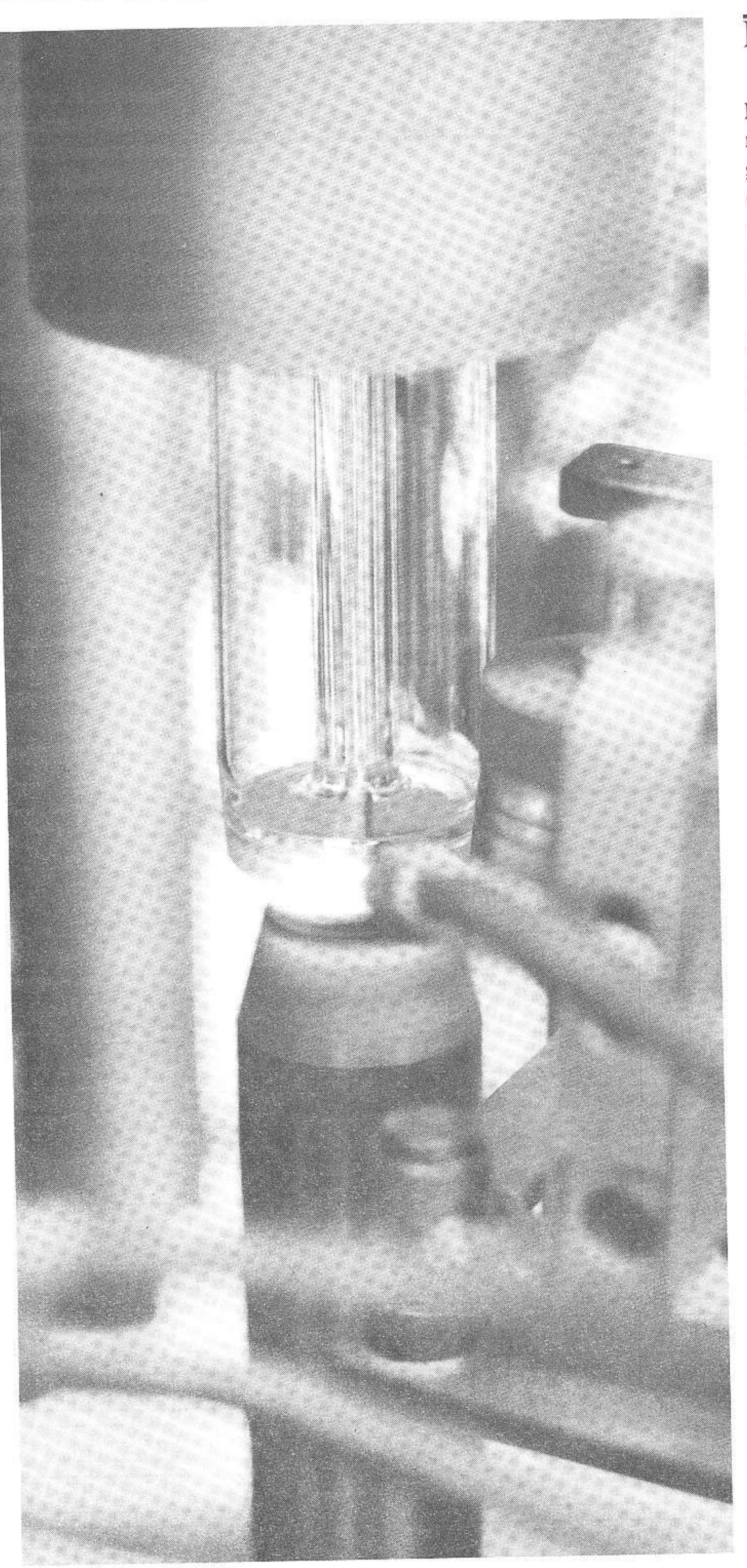


Risques et prévention

Professeur J. Malchaire
Unité Hygiène et Physiologie du Travail
Université Catholique de louvain

Sommaire

1.	Laser: principe d'émission	3
2.	Gamme de rayonnement laser	3
3.	Applications	4
4.	Propagation du faisceau	6
5.	Risques	8
6.	Exposition maximale permise (EMP)	9
7.	Recherche de la densité optique nécessaire des écrans de protection oculaire	10
8.	Distance nominale de risque oculaire DNRO	10
9.	Classes d'émission	10
10.	Prescriptions de fabrication	11
11.	Prescription pour l'utilisateur	12
12.	Surveillance médicale	15
13.	Réglementation Belge	16
14.	Conclusions	16



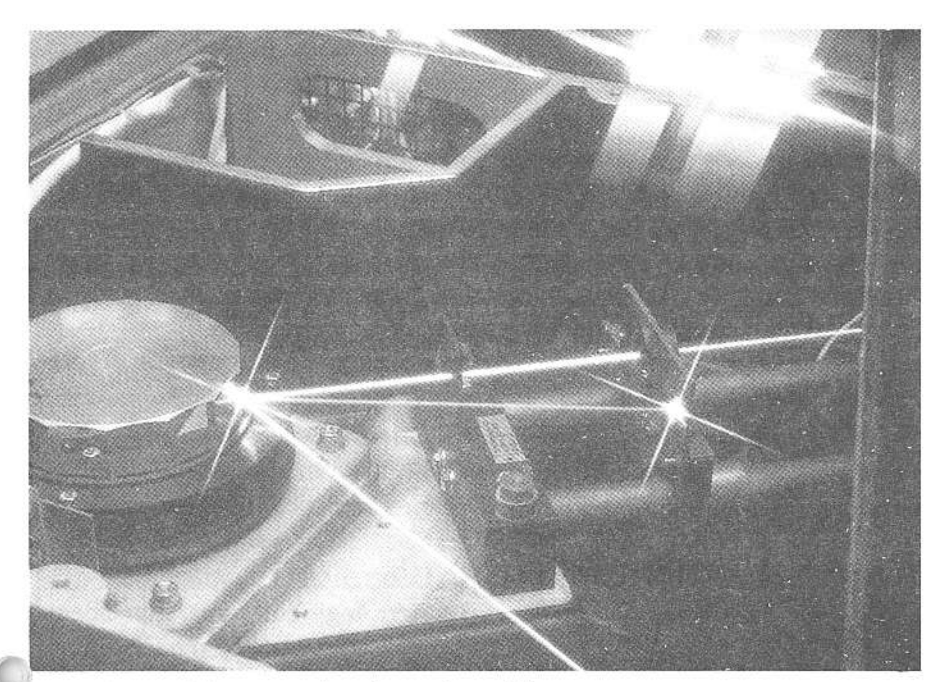
Résumé

Le présent document s'adresse aux responsables de la securite, de l'hygiène et de la médecine du travail et cherche à donner brièvement une vue d'ensemble du problème laser, des risques associés et des différentes approches de prévention.

Il n'aborde qu'indirectement les appareils intégrés aux machines, mais illustre particulièrement les problèmes rencontrés avec des appareils à faisceau libre, tels qu'appareils d'alignement et de repérage à distance. Un exemple de calcul concerne le laser Hélium-Néon assez courant.

Après avoir rappelé les caractéristiques générales et les différentes applicatons du laser, il présente le mode de calcul des éclairement et luminance énergétiques dans le cas d'une vision directe ou d'une réflexion diffuse. Les risques pour l'oeil, pour la peau et les risques annexes sont ensuite présentés, ainsi que les valeurs d'Exposition Maximale Permise (EMP) à partir desquelles sont estimées les densités optiques nécessaires pour les écrans de protection et les distances nominales de risque oculaire. Le système de classement des appareils est ensuite présenté ainsi que les Limites d'Emission Accessible et les risques s'y rapportant.

Le document aborde ensuite les mesures de prévention technique à prendre par le fournisseur et l'utilisateur, ainsi que les mesures de prévention organisationnelles et personnelles.
Le problème de la surveillance médicale est ensuite traité et le document se termine par le relevé des articles du Règlement Général pour la Protection du Travail concernant directement ou indirectement ce problème.



L'imprimante à laser peut imprimer très rapidement

1. Laser: principes d'émission

Si un filament de tungstène est soumis à une tension de 220 volts, il est chauffé, ce qui entraîne que certains électrons sont portés de leur niveau d'équilibre E_1 à des niveaux supérieurs E_2. Ces électrons vont repasser au niveau inférieur en émettant un photon de longueur d'onde fonction de la différence d'énergie entre les deux niveaux.

- Les niveaux E_1 et E_2 étant variables, la longueur d'onde est variable et le spectre de rayonement large.

- Les passages se font à tout instant de manière non synchronisée.

- L'émission s'effectue dans toutes les directions : le flux est omnidirectionnel.

Si, par contre, on choisit un matériau (solide, liquide, gazeux) tel que les niveaux E_1 et E_2 soient toujours les mêmes, la différence d'énergie est toujours la même et tous les photons ont la même longueur d'onde : le rayonnement est monochromatique.

Si l'état E_2 est suffisamment stable, il est possible d'organiser le retour - de stimuler l'émission - de sorte que le passage E_2 à E_1 avec émission d'un photon se fasse sous l'effet d'un premier photon incident : il y a alors amplification. Tous les photons sont en phase : cohérence temporelle.

Il faut, pour ce faire, envoyer le premier photon vers le matériau. Cela se fait au moyen de miroirs parallèles. Le matériau est ainsi emprisonné dans ce que l'on appelle une cavité résonante. Les photons non dans l'axe sont perdus dans l'environnement (d'où rayonnement faible mais réel dans toutes les directions). Ceux qui sont dans l'axe s'amplifient, d'où cohérence spatiale, rayonnement unidirectionnel.

On obtient ainsi un appareil donnant un rayonnement amplifié par émission stimulée : c'est un LASER : Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation.

En pratique, les rayonnements ne sont jamais ni parfaitement monochromatiques, ni parfaitement unidirectionnels, ni parfaitement en phase.

La cohérence spatiale fait en sorte que le faisceau garde son caractère unidirectionnel, ou sa faible divergence : un rayonnement laser dans le visible ne peut donc être vu que lorsque l'oeil se trouve dans le faisceau. En pratique, la diffraction et la réflexion sur les poussières ambiants entraînera une légère diffusion latérale.

2. Gamme de rayonemment laser

Les rayonnements laser peuvent être obtenus (à l'heure actuelle !) à des longueurs d'onde comprises entre 200 et 10^6 nm, soit à des longueurs d'onde correspondant à

l'UV lointain	C	: 200-280 nm
l'UV moyen	B	: 280-315 nm
l'UV proche	A	: 315-400 nm
le visible		: 400-760 nm
l'IR proche	A	: 760-1400 nm
l'IR moyen	B	: 1400-3000 nm
l'IR lointain	C	: 3000-1.000.000 nm = 3000 nm-1 mm.

Il n'existe donc pas de lasers émettant de rayonnement X (0.1 nm) ou gamma (0.0001 nm), ni aux longueurs d'onde plus grandes (microondes, ondes radio, ...).

3. Applications

La table 1, extraite d'un document INRS (Ulysse et Mayer 1986), décrit les caractéristiques essentielles et les domaines d'utilisation des principaux lasers. On distingue ainsi les lasers à gaz (dont le laser Hélium-Neon est le plus répandu), à milieu actif solide (en particulier le grenat d'yttrium et d'aluminium dopé au néodyme : le YAG) et à liquide (ou à colorants).

Pour chaque matériau actif, il faudra un type précis de cavité résonnante, un certain type de pompage (soit décharge électrique, soit éclair optique, soit réaction chimique, ...) et l'on obtiendra un rayonnement de longueur d'onde précise émis :

- soit de manière continue : on appelle lasers continus ceux pour qui la durée d'émission est supérieure à 0.25 s
- soit discontinue à impulsions relaxées obtenues par accumulation puis émission des photons : les impulsions ont une durée allant de la microseconde à quelques millisecondes et une fréquence de répétition de 1 à 10 Hz
- soit discontinue à impulsions déclenchées de durée nettement plus faible mais de puissance généralement plus importante.

Comme le montre la table 1, les puissances (si lasers continus) ou les énergies (si discontinus) sont très variables et peuvent paraître a priori dérisoires. Les risques sont dus au fait que toute l'énergie est concentrée dans un faisceau de très faible diamètre qui, de par sa cohérence, ne diverge pas.

On trouvera une littérature très riche décrivant différents types d'applications des rayons laser. Aussi nous bornerons-nous ici à citer pour mémoire quelques domaines principaux.

A. Militaires : desctruction à distance, repérage de cible.

B. Télécommunication, transport d'information; mesures à distance, disques compacts; télévisions, imprimantes, ...

C. Décoration : holographie.

D. Métrologie : mesures, alignement, holographie, mesure de pollution, météorologie.

E. Industrie : découpage (CO_2, 500 W à 200 kW), soudage (YAG, $C0_2$), gravure.

F. Médical : domaine chirurgical et thérapeutique.

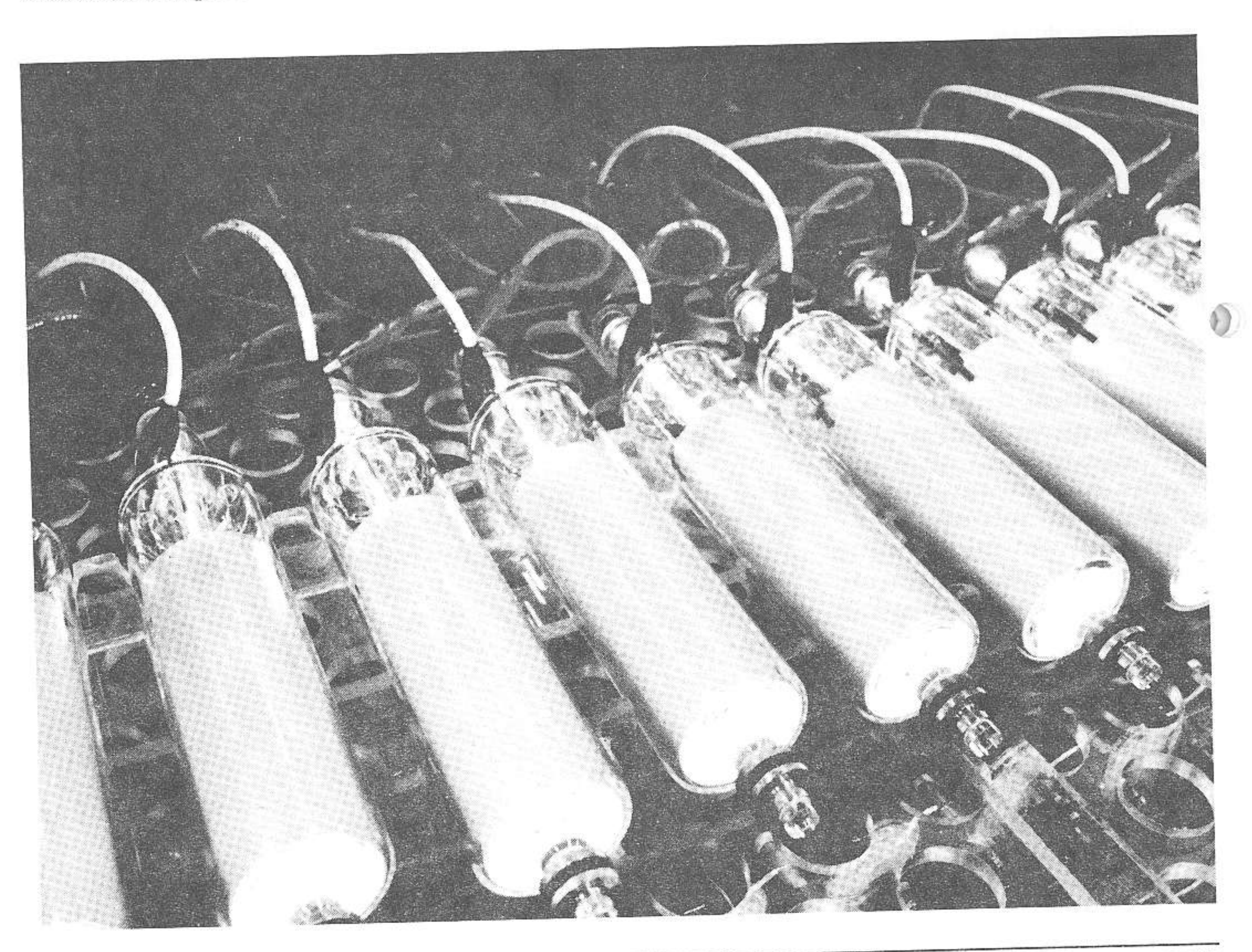


Tableau 1

Caractéristiques essentielles et domaines d'utilisation des principaux lasers

Matériaux actif	longueur d'onde en microns	Durée d'impulsions	Cadence des impulsions	Energie, puissance	Utilisations
gaz Hélium-néon	0,632	continu		0,1 à 100 mW	Travaux de chantiers (alignement, défilement de plans, guidage d'engins de T.P.,télémétrie, topographie) ; métrologie (réglage de machines, granulométrie, écartométrie, interférométrie) ; positionnement de montage (électronique) ; holographie; reconnaissance de signes codés; impression graphique.
Gaz ionisés (krypton, argon)	0,350 à 0,800	continu		0,1 W à 40 W	Télémétrie; holographie; spectroscopie; photocoagulation; recherche; spectacles.
Dioxyde de carbone	10,6	continu		1 W à 20 kW	Découpage de matériaux divers (métaux, plastique, réfractaires...) ; soudage de métaux et plastiques; traitement thermiques; chirurgie (odontologie, ORL...)
Azote	0,337	100 ns	1 à 10 Hz	1 mJ à 100 mJ	Photochimie; recherche; impression graphique.
Excimères (*)	0,190 à 0,350	10 à 60 ns	1 à 50 Hz	1 mJ à 50 mJ	Impression graphique; ophtalmologie; dermatologie.
Vapeurs métalliques	0,5 à 15	20 ns	quelques Hz	quelques mJ	Photothérapie.
solide Yag	1,06	30 ps à 10 ms et continu	1 à 50 000 Hz	0,1 mJ à 30 J jusqu'à quelques centaines de W	Vaporisation de métal; ajustage de résistances; recuits; ophtalmologie.
					Perçage et soudage (horlogerie, micromécanisme, électronique) gravure; chirurgie; recherche.
Rubis	0,694	30 ns	0,03 à 10 Hz	0,05 J à 10 J par impulsion	Holographie d'objets en mouvement; télémétrie.
		500 µs	Faible cadences : 10 Hz à 0,03 Hz	0,05 J à 5 J par impulsion	Micro-usinage; vaporisation de couches métalliques; perçage (diamant rubis) ; soudage (fils fins).
Verre dopé au néodyme	1,06	de 0,5 à 5 ms	10 à 20 impulsions par minute	1 J à 60 J par impulsion	Soudage par points; soudage de pièces et fils fins; gravure; perçage; spectrographie; recherche.
liquide colorants	variable 0,350 à 1	continu		quelques mW à quelques W	Spectroscopie; étude de matériaux; dermatologie.

(*) Adaptation de "excimers" = "excited dimers" , c'est-à-dire molécules dimères exitées.

Source: Ulysse J.F. et A., Les lasers, risques et moyens de protection I.N.R.S., ND 1607-124-86, Cahiers de notes documentaires n°125, 4ème trimestre 1986.

4. Propagation du faisceau

Dans cette section, nous voulons illustrer les caractéristiques principales d'émission et de propagation d'un faisceau laser. Nous nous limiterons à traiter d'un rayonnement continu et nous illustrerons les calculs dans l'exemple d'un laser Hélium-Néon émettant dans le visible. Il s'agit donc de l'émission d'une lumière cohérente et monochromatique : nous tenterons d'établir la correspondance avec les unités d'éclairage plus connues.

Caractéristiques de base	Exemple
Soit un laser de longueur d'onde λ nm et de flux énergétique F Watts	He-Ne λ = 633 mm F = 10 mW
A ce flux énergétique émis, correspond un flux lumineux, exprimé en lumens. A 555 nm, longueur d'onde (jaune) pour laquelle la sensibilité de l'oeil est maximale en vision de jour (photopique), 1 Watt lumineux correspond à 630 lumens. Aux autres longueurs d'onde, 1 Watt lumineux correspond à 630.s lumens ou s est la sensibilité spectrale de l'oeil	à λ = 633 nm, s = 0.12, donc F = 0.76 lm
Le faisceau a un certain diamètre à la sortie : d mètres	d = 5 mm
Il présente un certain angle de divergence θ mrad	θ = 1 mrad soit 1 m à 1 km
On peut donc en déduire l'angle solide du cône du faisceau $\Omega = 2\pi(1 - \cos\theta/2)$ stéradian	$\Omega = 7.85\ 10^{-7}$ sr
L'intensité du faisceau est définie par le flux lumineux par stéradian, soit $I = F/\Omega$ W/sr	I = 12.7 kW/sr
En éclairage, l'intensité lumineuse s'exprime en candelas	pour F = 0.76 lm I = 1.000.000 cd

Vision dans le faisceau à la distance X

Le diamètre du faisceau à la distance X est : $D = d + 2X \operatorname{tg} \theta/2 \cong d + X\theta$	X = 2 m D = 7 mm
La section du faisceau est = $S = \pi D^2/4$	S = 38.5 mm^2
L'éclairement énergétique est la densité de flux par unité de surface : $E = F/S$ Watts/m^2	E = 260 W/m^2
En éclairage, cet éclairement s'exprime en lux	E = 20.000 lux
La luminance dans le faisceau est l'intensité par unité de surface : $L = I/S$ Watts/m^2/sr	L = 330 MW/m^2/sr
En éclairage, la luminance s'exprime en cd/m^2 = nit	pour F = 0.76 lm L = 25 10^9 cd/m^2

Cette luminance peut être comparé à celle du soleil, égale à 20 $MW/m^2/sr$	le faisceau est donc 16 fois plus lumineux que le soleil. On comprend dès lors mieux les risques qui y seront associés

Vision du faisceau réfléchi par un miroir parfait

Soit le point de vision à la distance X_2 d'un miroir réfléchissant totalement sans absorption et situé à la distance X_1 de la source.
En fait, l'exposition sera la même que si le miroir n'existait pas et que la distance de vision était égale à $X_1 + X_2$.
On se retrouve donc dans la même situation que dans le cas précédent.

Vision d'une tache après réflexion parfaitement diffuse, sans absorption

La situation est différente si la surface réfléchissante est parfaitement diffusante (Lambertienne), c.à.d. telle que la luminance de la tache sur cette surface est la même quelle que soit la direction de vision.

Soit une surface diffusante à distance X_r disposée à un angle α par rapport à la perpendiculaire au faisceau	$X_r = 2$ m $\alpha = 45°$
La tache est une ellipse de surface $S_r = \pi (d + X_r \theta)^2/4/\cos \alpha$	$S_r = 54.4$ mm²
Le diamètre moyen de la tache (pour θ petit) est $D_r = 4 S_r/\pi$	$D_r = 8.3$ mm
L'éclairage de la tache $E_t = F/S_r$ W/m²	$E_t = 184$ W/m² (14.000 lux)
Suivant la loi de Lambert, la luminance de la tache dans toutes les directions est donnée par $L = E_t/\pi$	$L = 58$ $W/m^2/sr$ (4400 cd/m²)
et l'éclairement diffus à la distance X dans la direction β, par rapport à la perpendiculaire à la tache $E = E_t ((D_r/2)^2)/X^2 \cos \beta$ E = 2.6 mW/m² (0.2 lux)	X = 1 m $\beta = 30°$
Cet éclairement est beaucoup plus faible que dans le cas précédent et l'on comprend dès lors que le risque sera beaucoup moindre.	

Vision sur une surface quelconque

En situation réelle, on voudra déterminer le risque de vision du faisceau réfléchi par une surface quelconque. On ignore cependant les caractéristiques de diffusion, c.à.d. le coefficient de réflexion, en fonction de la longueur d'onde et de la direction. Ces caractéristiques sont d'ailleurs susceptibles de varier au cours du temps. On devra dès lors formuler des hypothèses pessimistes allant dans le sens de la sécurité. Ces dernières seront : réflexion spéculaire sans absorption. On se trouve dans le cas d'une réflexion par un miroir.

Vision au moyen d'appareils optiques

Dans certains cas (topographie, alignement, médecine, ...), des appareils optiques (jumelles, microscopes, ...) sont utilisés pour localiser le faisceau ou son impact. Si l'appareil optique est de grossissement K, l'éclairement énergétique au niveau de la pupille sera K fois plus grand et le danger sera fortement accru.

5. Risques

A. Risques annexes

Nous passerons d'abord brièvement en revue les risques annexes liés à l'appareil générant le rayonnement et à contrôler au niveau de l'appareil ou de l'environnement.

1. Risques électriques : haute tension d'alimentation, batteries de condensateur, ...

2. Risques calorifiques : risques d'incendie ou d'explosion liés au dégagement calorifique, l'énergie de pompage n'étant traduite en rayonnement utile qu'avec généralement des rendements faibles de 0.1 à 25%. Risques d'incendie également dus à l'échauffement des matériaux présents dans l'espace de travail et susceptibles de recevoir le faisceau.

3. Risques cryogéniques liés au système de refroidissement de l'appareil (azote liquide, etc...).

4. Risques chimiques liés à l'émission de substances chimiques soit du milieu, soit du matériau cible (vaporisation du matériau ou de produits de surface tels que solvants ou peintures), soit par réaction chimique (ozone due aux UV);
risque d'asphyxie par diminution de la concentration en oxygène dans l'espace de travail.

5. Rayonnement parasite UV, visible ou IR s'échappant de l'appareil, ou rayonnement dû aux lampes à éclair d'excitation...

B. Risques directs du rayonnement laser

1. Risques pour l'oeil

La figure 1 donne la transmission du système oculaire aux différentes longueurs d'onde. Il en ressort que

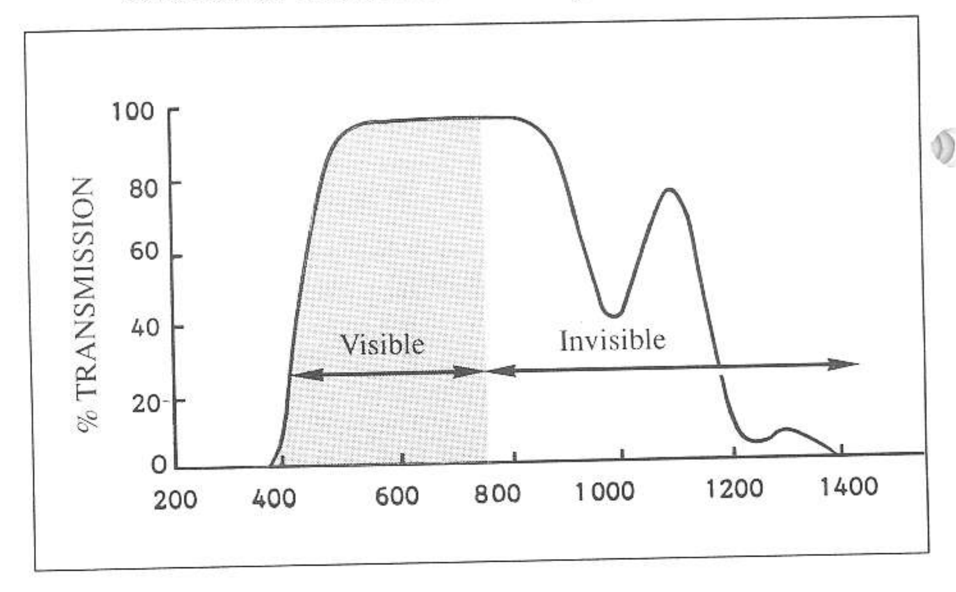
- aux longueurs d'onde inférieures à 400 et supérieures à 1400 nm : l'énergie du faisceau incident est absorbée par les tissus et la cornée sans focalisation par l'oeil. Les effets sont donc superficiels.
UV C et B 200 - 315 nm : absorption par la cornée, effets identiques à la soudure à l'arc, conjonctivite, photokératite.
UV A 315 - 400 nm : cataracte photochimique (opacification du cristallin).
IR B 1400 - 3000 nm : inflammation aqueuse, cataracte, brûlure de la cornée.
IR C 3000 nm - 1 mm : brûlure de la cornée.

- aux longueurs d'onde comprises entre 400 et 1400 nm, c.à.d. dans le domaine du visible et de l'infrarouge proche : le faisceau est focalisé sur la rétine.
Le diamètre de la pupille (2 à 8 mm) étant dans la situation la plus défavorable de 7 mm, et l'image sur la rétine étant de l'ordre de 0.01 mm de diamètre, la focalisation est de 500.000 fois. L'éclairement de la rétine est donc 500.000 fois plus grand que l'éclairement de la pupille, ce qui entraîne des lésions photochimiques et des brûlures de la rétine.

. Pour la lumière visible (400 - 760 nm), la durée d'exposition est limitée après environ 0.25 secondes par le réflexe palpébral (fermeture des paupières) en réaction à l'éblouissement très important ressenti.
. Pour le rayonnement IR-A (760 - 1400 nm) par contre, l'éblouissement est absent, aucune protection n'est offerte et l'oeil ne se rend compte de rien, tant que n'apparaît pas une sensation de brûlure : le dommage est déjà réalisé.

Figure 1

Courbe de transmission du système oculaire



L'énergie est peu absorbée (5 %) par les cônes et bâtonnets, mais surtout par l'épithélium pigmentaire (mélanine). L'échauffement va brûler l'épithélium et les cônes et bâtonnets adjacents et donc entraîner une tache aveugle.

En général, les lésions ne donnent lieu à une perte de vision que si elles concernent la fovea : impression de tache blanche, devenant tache noire après quelques semaines, puis disparition par adaptation si l'atteinte n'est pas trop importante. Si la zone atteinte est périphérique, les lésions ne sont perçues que si elles sont importantes.

2. Risques pour la peau

Les effets sont fonction de la longueur d'onde, de la puissance, de la durée d'exposition et de l'absorption, fonction elle-même de la pigmentation. La plupart des dommages sont dus à l'échauffement des tissus et limités à la zone exposée ou aux zones avoisinantes du fait de la conduction thermique. Les effets sont superficiels puisque le rayonnement est totalement transformé en chaleur dans les 3 premiers millimètres d'épaisseur de la peau. Le dommage peut être dû à l'explosion des cellules (vaporisation), à la destruction des cellules par échauffement, à la dénaturation de molécules (protéines) ou en général à des réactions chimiques particulières activées par l'apport thermique.

Les effets les plus importants sont
. UV : érythème, pigmentation, accélération du vieillissement
. Visible - IR : brunissement du pigment, réactions photosensibles, brûlures.

6. Exposition maximale permise (EMP)

Comme pour les TLV ou d'autres valeurs limites dans d'autres domaines, les EMP ont été fixées en-dessous des niveaux connus comme donnant lieu à un risque et ne constituent pas des délimitations précises entre sécurité et danger. Elles doivent servir à l'utilisateur pour le contrôle de l'exposition et le choix des lunettes de protection.

comprises entre 400 et 1400 nm, des valeurs de EMP différentes sont proposées suivant qu'il s'agit
- d'une vision directe dans le faisceau (éventuellement après réflexion spéculaire
- de la vision d'une tache diffusante ou d'une source étendue à courte distance de sorte que l'image rétinienne soit elle-même étendue.



Les EMP sont données en terme d'éclairement énergétique (W/m^2) ou de luminance énergétique ($W/m^2/sr$), ou encore en terme d'exposition énergétique ($joules/m^2$) ou de luminance intégrée ($J/m^2/sr$), en fonction :
- de la longueur d'onde (200 à 10^6 nm)
- de la durée d'exposition (< 10^{-9} à 30.000 secondes).

Les EMP sont les mêmes pour la peau ou l'oeil pour les lasers de longueur d'onde non focalisable.
Par contre, pour les longueurs d'onde

La norme CEI 825 (1984) présente les tables des EMP. Leur utilisation en pratique est loin d'être simple et exige une maîtrise parfaite de la physique et des unités.

Nous illustrerons l'utilisation de ces expositions maximales permises par le calcul de la densité optique nécessaire pour les écrans de protection et la détermination de la distance nominale de risque oculaire.

7. Recherche de la densité optique nécessaire des écrans de protection oculaire

Le problème est de déterminer l'atténuation que doivent offrir les moyens de protection oculaire (lunettes, écrans, ...). Nous reprendrons l'exemple du laser continu Hélium-Néon traité ci-dessus.

Soit un laser de longueur d'onde de λ puissance (flux énergétique) F Watts de diamètre de sortie d m et divergence θ radian	H_e-N_e λ = 633 nm F = 10 mW d = 5 mm θ - = 1 mrad
risquant d'être regardé dans le faisceau à la distance X	X = 0 m

A défaut de mesures organisationnelles empèchant l'accès à certaines zones proches de l'appareil, il faudra faire l'hypothèse la plus pessimiste d'une vision directe à l'orifice même d'émission. Dans ce cas X = 0

Comme vu précédemment, on peut calculer le diamètre du faisceau D la section du faisceau S l'éclairement énergétique E	D = 5 mm S = 19.6 mm^2 E = 510 W/m^2
La norme CEI 825 renseigne pour ce laser une EMP que l'on va convertir en Eclairement maximal Emax	EMP = 18 $t^{0.75}$ j/m^2

L'exposition étant limitée à t=0.25 (temps d'action du réflexe palpébral), on obtient EMP = 6.36 J/m^2 qui est l'énergie maximale admissible par unité de surface au niveau de la pupille

La puissance maximale par unité de surface, c.à.d. l'éclairement énergétique au niveau de la pupille est E_{max} = EMP/t = 6.36/0.25 = 25.4 W/m^2

Le facteur d'atténuation nécessaire est E/E_{max}	510/25.4 = 20
La desité optique nécessaire est calculée par DO = log (E/E_{max}) majorée à l'unité supérieure	DO = (1.30) = 2

On aura donc à rechercher des écrans procurant une densité optique DO pour la longueur d'onde concernée.

Dans le cas d'utilisation de jumelles de grossissement K pour distinguer au loin la source, ou la tache spéculaire, l'éclairement est K fois plus grand, le facteur d'atténuation K fois plus grand et DO avec jumelle = DO_{sans} + log K

8. Distance nominale de risque oculaire DNRO

Le risque (oculaire ou autre) existe tant que l'éclairement est supérieur à l'éclairement maximal, c.à.d. jusqu'à une distance X telle que $E_x = E_{max}$. Cette distance est appelée "distance nominale de risque oculaire DNRO". Or, en vision directe $E_x = F/[\pi (d + X \theta)^2/4]$, d'où l'on peut tirer la distance telle que $E_x = E_{max}$.

Dans l'exemple ci-dessus X = 17.4 m. Au delà, le faisceau est suffisamment élargi que pour qu'il n'y ait plus de risque.

9. Classes d'émission

Afin de simplifier l'approche du problème sécurité laser, la norme CEI 825 recommande un système de classification à 5 classes pour lesquelles elle impose des limites, appelées Limites d'Emission Accessible (LEA), exprimées soit en puissance (Watts), soit en énergie (Joules), soit encore en luminance (W/m^2/sr) ou luminance intégrée (J/m^2/sr), fonction des longueurs d'onde et des durées d'exposition. Nous présentons ci-dessous les principes de cette classification. Les libellés en gras présentent le texte des étiquettes d'identification à afficher sur l'appareil et l'installation.

Classe 1 :

Appareil à laser de classe 1

Ces lasers sont intrinsèquement sans danger, les EMP ne risquant pas d'être dépassées même en cas de vision du faisceau directement à la sortie.

Classe 2 :

Rayonnement laser (invisible)
Ne pas regarder dans le faisceau
Appareil à laser de classe 2

Il s'agit de lasers émettant dans le **Visible** (400-700 nm) et de puissance

- inférieure à la LEA de la classe 1 si la durée d'exposition est inférieure à 0.25 s
- inférieure à 1 mW pour des durées supérieures à 0.25 s. Dans ce cas, le réflexe palpébral limite l'exposition à 0.25 s, de sorte que l'EMP n'est pas dépassée.

Classe 3A :

Rayonnement laser (invisible)
Ne pas regarder dans le faisceau ni à l'oeil nu ni à l'aide d'un instrument d'optique
Appareil à laser de classe 3A

Il s'agit de lasers de faible danger de toute longueur d'onde

- visible : la LEA est cinq fois plus élevée que pour la classe 2 et l'éclairement maximal = 25 W/m² en tout point du faisceau. Le réflexe palpébral offre une protection suffisante en vision directe
- aux autres : LEA 5 fois plus élevée que pour la classe 1.

Classe 3B :

Rayonnement laser (invisible)
Exposition au faisceau dangereuse
Appareil à laser de classe 3B

Ces lasers, de LEA inférieure à 0.5 W ou 10^5 J/m² offrent toujours un risque en vision directe. En vision diffuse ne se pose aucun risque si la tache est non focalisée, si la distance de vision est supérieure à 13 cm et si la durée d'exposition est inférieure à 10 s.

Classe 4 :

Rayonnement laser (invisible)
Exposition dangereuse de l'oeil et de la peau
Au rayonnement direct ou diffus
Appareil à laser de classe 4

Dispositifs de puissance présentant des puissances de sortie telles qu'un risque existe que la vision soit diffuse aussi bien que directe.

Exemple :

Le laser H_eN_e 10 mW, d = 5 mm, θ = 1 mrad est de classe 3B parce que la puissance est supérieure à 5 mW et l'éclairement énergétique à la sortie du faisceau égal à 510 W/m², c.à.d. supérieur à 25 W/m² (5 mW et 25 W/m² étant les LEA de la classe 3A).

La classification de l'appareil est de la responsabilité du fournisseur. Elle donne une indication sur l'existence ou non du risque. Le contrôle du risque doit être réalisé sur base des Expositions Maximales Permises (EMP).

10. Prescriptions de fabrication

Nous nous bornerons ici à citer les éléments de sécurité devant être prévus par le fabricant selon le document CEI 825, où l'on trouvera un développement de ces recommandations. Les classes pour lesquelles ces éléments sont à prévoir sont indiquées entre parenthèses.

1. Capot de protection (1, 2, 3A, 3B, 4) empêchant toute émission supérieure à LEA (1) quand l'appareil est non utilisé, tel que le déverrouillage soit rendu difficile (outils spéciaux) et provoque l'arrêt automatique de l'émission ou le déclenchement d'un signal sonore ou visuel (compte tenu des lunettes de protection).
2. Connecteur de verrouillage à distance (3B et 4) permettant de couper l'émission automatiquement lors de l'ouverture de porte, de court-circuitage des éléments de protection, ...
3. Dispositif de commande spécial (clé, carte, code...) (3A, 3B, 4).
4. Avertisseur d'émission (3A, 3B, 4) sonore ou visuel dès que l'appareil est en fonctionnement ou va être mis en fonctionnement. Ce signal visuel doit tenir compte des caractéristiques spectrales des lunettes de sécurité.
5. Dispositif d'arrêt ou d'atténuation du faisceau (3A, 3B, 4) quand l'appareil est en attente de sorte que l'émission ne dépasse pas les limites de la classe 1.
6. Optiques, écrans de visualisation tels qu'il n'y ait pas d'exposition à risque en fonctionnement normal, en particulier quand le contrôle s'effectue par lunettes ou microscopes.



Une application très connue est le scanner au laser pour la lecture des codes-barres dans les grands magasins

7. Etiquettage selon la classe (voir ci-dessus section 9) sur l'appareil, la documentation, sur l'enceinte de travail, sur les panneaux de verrouillage...
8. Indication des type, puissance, durée et longueur d'onde (1, 2, 3A, 3B, 4).
9. Désignation et étiquettage des orifices d'émission.
10. Toutes les mesures de protection des parties haute tension de l'appareil (1, 2, 3A, 3B, 4).
11. Manuel d'utilisation reprenant les caractéristiques, les procédures d'emploi, les recommandations de sécurité.

11. Prescriptions pour l'utilisateur

Il s'agit ici des mesures à prendre par l'utilisateur pour que, en utilisation, l'émission laser ne présente pas de risque. A nouveau, le lecteur trouvera un développement de ces recommandations dans le document CEI 825 ainsi que dans les publications de Sliney et Wolbarsht (1985), Ulysse et Mayer (1986) et Winburn (1984).

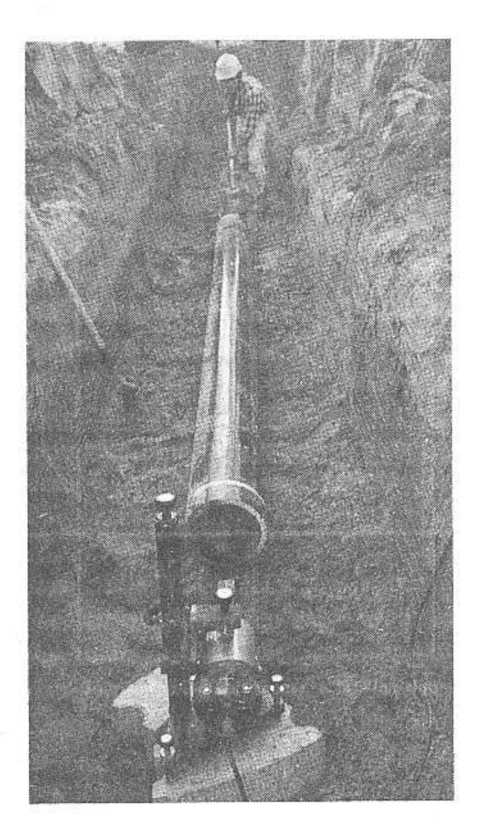
a. Installation : protection collective

1. Enceinte de protection (3B et 4) avec signalisation enfermant la zone de travail de tous les côtés.
2. Connecteur de verrouillage à distance relié aux voies d'accès, ainsi qu'à des boutons de sécurité disposés aux endroits critiques (tableau de commande ...).
3. Panneaux avertisseurs d'émission (sonores, visuels) (3A, 3B, 4).
4. Utilisation du système de commande (clé, ...).
5. Trajets du faisceau si possible en dehors de la zone où risquent de se trouver les yeux (2, 3A, 3B, 4), c.à.d.
- soit en hauteur, au-dessus de la ligne des yeux,
- soit enfermés dans une enceinte (tube...).

6. Signalisation du trajet du faisceau : ceci est particulièrement nécessaire pour les travaux en plein air.
7. Placement d'atténuateur, écrans diffusants, en fonction de l'application, pour éviter les visions directes ou spéculaires, mais également repérer facilement la position du faisceau. Rappelons en effet que même dans le cas d'un faisceau émettant dans le visible, l'opérateur n'en a aucune perception s'il ne se trouve pas strictement dans l'axe. Des écrans diffusants permettant de rechercher la direction du faisceau sont donc nécessaires afin d'éviter que cette recherche ne s'effectue par l'oeil directement.
Les écrans opaques seront, du côté faisceau éventuel, sombres et mats en matière non inflammable : il s'agit par exemple de plaques d'aluminium anodisé.
Les écrans translucides, permettant de garder une bonne vision des opérations, seront choisis selon les critères exposés ci-dessous pour les lunettes de sécurité.
8. Absence d'objets étrangers susceptibles de réflexions spéculaires dans l'espace de travail et a fortiori dans les trajets utiles (vitres, miroirs, bouteilles, montres, surfaces nickelées, chromées, ...).
Attention également aux réflexions dues aux surfaces mouillées, en particulier lors du travail à l'extérieur.
9. Accès interdit aux personnes non autorisées.
10. Eclairage ambiant intense de manière à assurer un travail en toute sécurité et à réduire le diamètre de la pupille
- parois du local plutôt sombres (mais pas noires) parfaitement mates
- fenêtres évitées ou couvertes de rideaux sombres mats ininflammables.

11. Impossibilité de transporter ou de manipuler l'appareil lorsqu'il est en fonctionnement.
12. Mesures de sécurité électrique adéquates.
13. Mesures de sécurité mécanique (contre les bris de cible, explosions, ...).
14. Prévention incendie : emploi de matériaux incombustibles pour et à l'intérieur de l'enceinte.
15. Ventilation adéquate du local s'il existe un risque d'émissions toxiques ou d'appauvrissement en oxygène.

En fait, une étude globale des conditions de travail (étude ergonomiqe) doit être réalisée de manière à préciser les procédures optimales de travail, les outils nécessaires (écrans de repérage, accessoires ...), la disposition optimale, les zones à protéger, les moyens de cette protection et enfin l'ambiance générale de travail.



Utilisation d'un appareil à laser sur chantier

b. Protection au niveau du personnel

Les équipements de protection individuelle ont pour but de compléter la protection collective par écrans ou capots. Ils sont particulièrement nécessaires lorsque la source ou la cible sont mobiles de sorte qu'existe un risque d'exposition accidentelle. La norme NBN SO6-005 donne les spécifications relatives aux lunettes de sécurité laser générales. Les lunettes ne peuvent constituer le moyen de protection principal que dans des circonstances de travail exceptionnelles telles que la conception, l'entretien ou la réparation de l'appareil par du personnel particulièrement qualifié. La norme SO6-006 concerne les lunettes pour ces opérations de réglage. Insistons sur le fait que l'on ne se protège pas contre le rayonnement laser en général, mais bien contre un rayonnement d'une intensité donnée à une longueur d'onde donnée, pour un appareil donné. La protection n'est donc pas polyvalente mais bien spécifique à chaque cas particulier.

1. Protection des yeux

Cette protection est à prévoir pour tous les appareils de classe 3B et 4. Les exigences et critères de choix sont les suivants :

a. La densité optique doit être calculée comme précédemment à partir des valeurs limites EMP et pour les conditions de vision les plus pessimistes, c.à.d. en cas de vision directe ou de réflexion spéculaire du faisceau.

b. Cette densité est à obtenir à la longueur d'onde du laser.

c. Les lunettes doivent permettre la vision la plus normale, c.à.d. avoir la transmission la plus grande possible dans le domaine du visible. On recommande un facteur de transmission minimal de 20% pour les lunettes de protection générale et 40% pour les lunettes de réglage. Les lunettes ne devraient pas déformer les couleurs, c.à.d. devraient avoir la même transmittance dans tout le domaine du visible. Cela sera possible pour des lunettes destinées à des rayonnements dans l'infra-rouge ou le visible. C'est le cas des filtres dont la courbe de transmission est donnée à la figure 2a : les longueurs d'onde inférieures à 450 nm (UV et violet) sont bloquées mais la transmission est de l'ordre de 60% dans le reste du domaine visible.

Ce sera par contre impossible à atteindre lorsqu'il s'agit d'atténuer un rayonnement visible, comme le montrent les figures 2b, 2c et 2d.

La figure 2b décrit la transmission de lunettes de densité optique 6 dans la gamme de longueurs d'onde inférieures à 550 nm; ces lunettes gardent une transmission de quelque 80% pour les longueurs d'onde supérieures à 650 nm; elles seront donc particulièrement indiquées pour un rayonnement laser à l'argon ($\lambda < 514$) mais pas pour un hélium-néon ($\lambda = 633$ nm) et a fortiori YAG (1060 nm). Ces lunettes laisseront passer essentiellement le rouge et l'éclairage ambiant devra être prévu en conséquence : éclairage «chaud» à basse température de couleur.

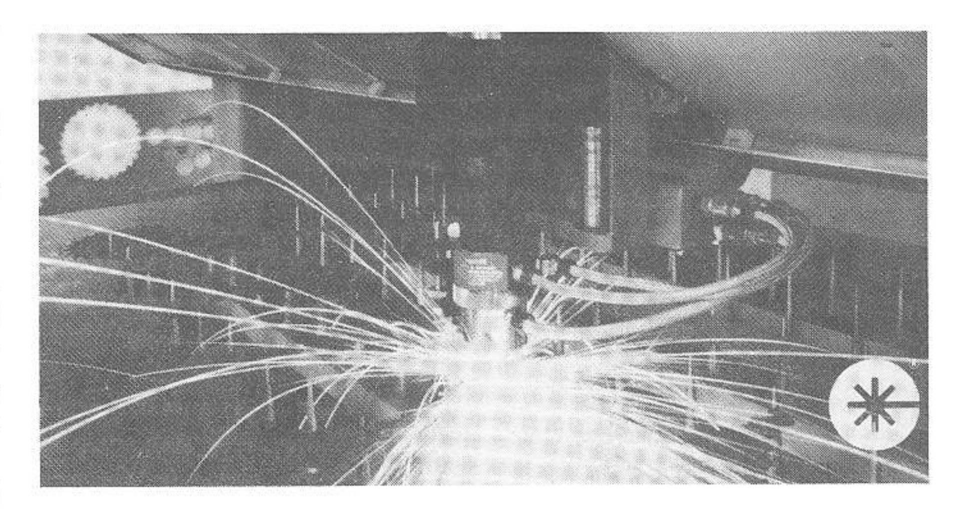


Figure 2a

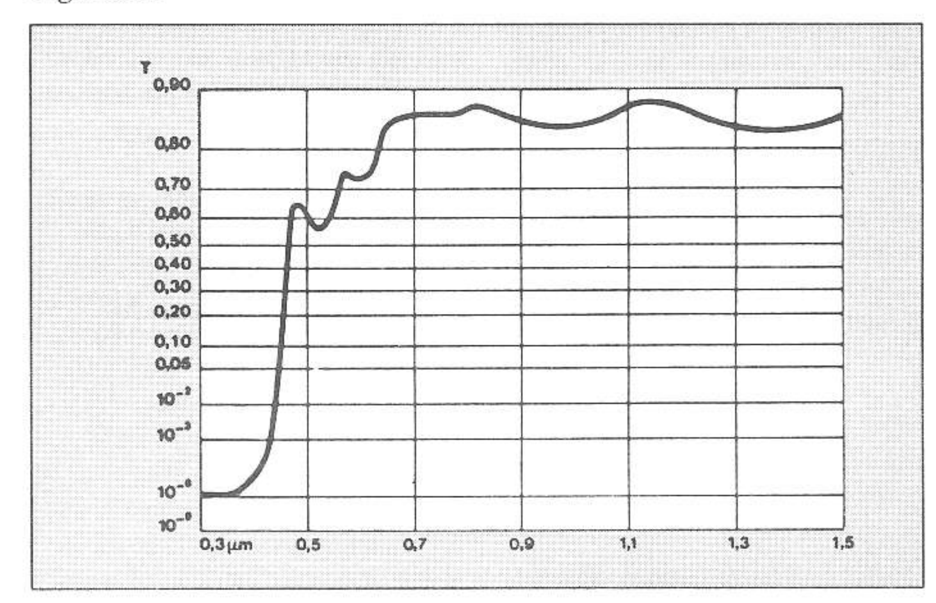
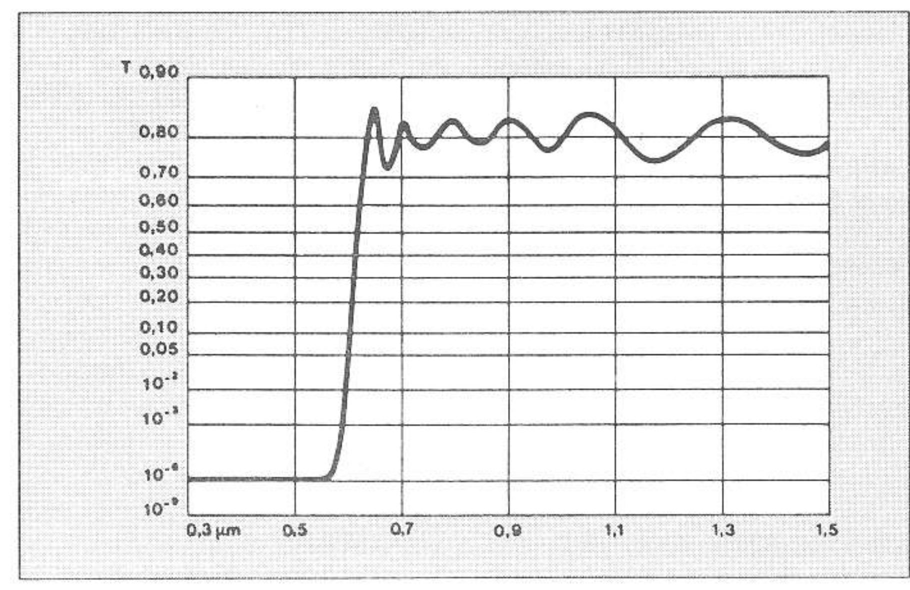


Figure 2b



Courbes de transmission en fonction de la longueur d'onde (Documentation MTO, Massy, France)

Figure 2c

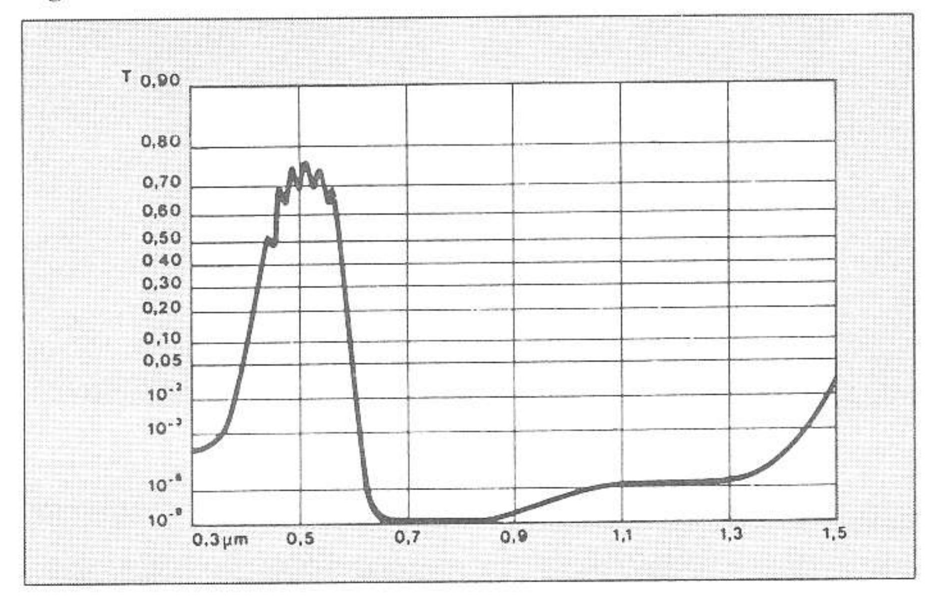
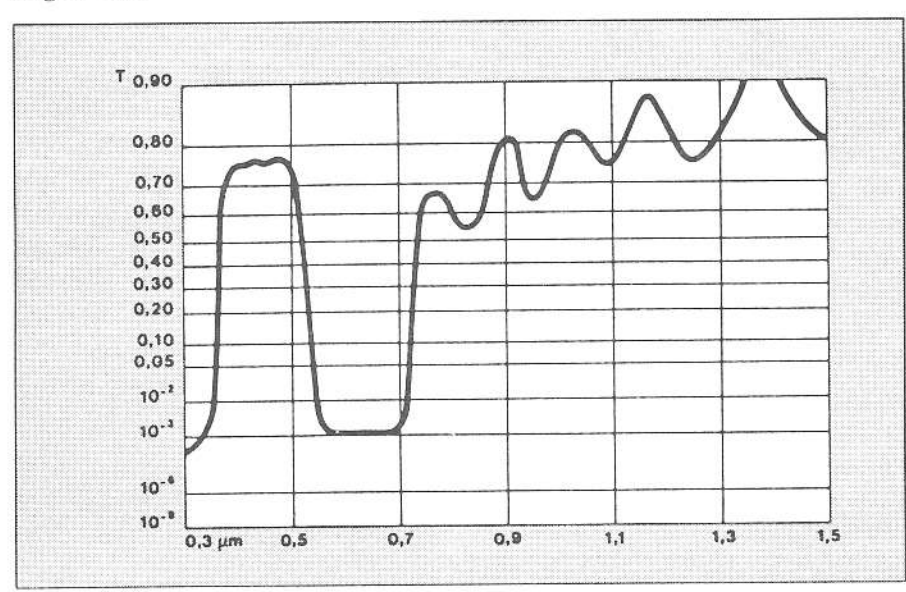


Figure 2d



Courbes de transmission en fonction de la longueur d'onde (Documentation MTO, Massy, France)

La figure 2c donne pratiquement l'inverse du cas précédent : transmission de 70% pour les longueurs d'onde comprises entre 450 et 550 nm et densité optique du 9 au delà de 650 nm. Ces lunettes seront donc optimales pour un rayonnement YAG et d'efficacité nulle pour un rayonnement laser à l'argon. Ces lunettes ne laisseront passer que le violet, le bleu et le vert et l'on aura donc intérêt cette fois à installer un éclairage fluorescent de température de couleur élevée (lumière froide).

Enfin, la figure 2d donne la courbe de transmission optique de lunettes bloquant, avec une densité optique de 3, les longueurs d'onde comprises entre 550 et 690 nm. Ces lunettes sont adaptées au cas du laser hélium-néon (633 nm) et donnent une bonne vision (75%) du bleu et du violet. A nouveau, l'éclairage ambiant doit être de température de couleur élevée.

d. Les verres de peuvent évidemment se détériorer ni perdre leur efficacité sous l'influence du rayonnement laser. Certains verres ne peuvent dissiper l'énergie thermique apportée par le faisceau incident et vont soit brûler ou fondre dans le cas de verres organiques, soit éclater pour le verre minéral. Les normes belges citées précédemment définissent le code d'essai des lunettes à savoir le nombre d'impulsions, la durée et la puissance du rayonnement laser auxquels les filtres doivent au minimum résister.

e. Les lunettes doivent avoir de bonnes propriétés mécaniques de résistance aux chocs, aux griffes, etc... Des lunettes endommagées ne peuvent plus être utilisées.

f. Les montures et écrans latéraux doivent être opaques ou offrir la même protection que les verres.

g. Enfin et surtout, les lunettes doivent obéir aux mêmes exigences de confort que les lunettes de protection plus ordinaires, à savoir, poids faible, aération ou traitement antibuée, possibilité d'insertion des lunettes correctrices, qualité de la vision périphérique dans un cône de 90° d'angle au sommet et qualités optiques en général : pas d'aberrations géométriques...

Le problème des lunettes de protection est relativement aisé à gérer dans le cas d'un seul laser émettant à une longueur d'onde fixe. Une attention particulière est nécessaire dans le cas de l'utilisation de plusieurs appareils de logueurs d'onde différentes ou d'un appareil de longueur d'onde variable. Dans ces cas, il est préférable de rechercher la protection oculaire unique satisfaisant à l'ensemble des conditions et forcément moins optimale que plusieurs protections spécialisées.

En pratique, les lunettes de protection générale ou de réglage doivent comporter une marque durable, reprenant les caractéristiques principales suivantes :

- la puissance maximale du laser
- la longueur d'onde ou le domaine de longueurs d'onde pour lequel les lunettes offrent la protection
- un numéro d'échelon correspondant à la densité optique

- une marque d'identification du fabricant
- une marque de contrôle éventuelle
- d'autres informations éventuelles concernant la résistance mécanique.
Ces informations sont définies par les normes mentionnées que tout utilisateur d'appareils 3B et 4 doit immanquablement se procurer.

2. Vêtements de protection (3B, 4)

Dans le cas de lasers de classes 3B et 4, présentant un risque pour les yeux et la peau, se pose donc le problème de vêtements de protection. Ces vêtements devront être fabriqués dans une matière ininflammable résistante à la chaleur. En particulier, des gants de travail résistants à la chaleur doivent être prévus lorsqu'il est nécessaire d'intervenir manuellement dans l'espace visé ou de manipuler les objets visés. Ces gants seront de préférence en coton à bouclettes ou en tissu spécial du genre Nomex ou Kermel (Ulysse et Mayer 1986).

c. Mesures de contrôle

Comme dans toute situation où se pose un problème de sécurité, les mesures techniques et, a fortiori, les mesures de protection individuelle, ne peuvent être efficaces que si le personnel a été non seulement informé, mais formé en ce qui concerne les risques propres à l'appareil laser qu'il utilise, sur son maniement, les procédures de contrôle (signaux ...), la protection individuelle et les procédures de rapport d'accident.

Cette formation s'accompagnera d'un établissement clair des responsabilités, à savoir :
- nombre et identité des manipulateurs
- personnes désignées pour intervenir en cas d'accident
- responsable sécurité laser central unique et mentionné sur les voies d'accès
- contrôle périodique des installations pour la partie émission laser mais également pour tout l'environnement technique et en particulier la partie électrique de l'installation.

12. Surveillance médicale

Il paraît établi à l'heure actuelle (Goldman et al., 1982; Sliney and Wolbarsht, 1985; Winburn, 1984) que

1. des lésions faibles risquent d'être non détectées par le sujet si elles ne concernent pas la fovéa,
2. il est peu probable qu'elles soient détectées lors d'un examen ophtalmique même réalisé par une ophtalmologue spécialisé sur les problèmes liés aux lasers,
3. les lésions de la rétine deviennent atypiques après quelques jours et la relation causale du laser ne peut être établie que par analyse des circonstances d'exposition.

Dès lors, le groupe de travail de l'OMS (Goldman, et al., 1982) formulait comme recommandation dès 1977 :
- un examen ophtalmique pré et post emploi dans le cas d'utilisation d'un laser de classe 3A, 3B ou 4
- un examen ophtalmique et/ou dermatologique par un expert qualifié immédiatement après toute exposition susceptible d'avoir dépassé les valeurs limites (et analyse détaillée des circonstances ayant conduit à cette exposition).

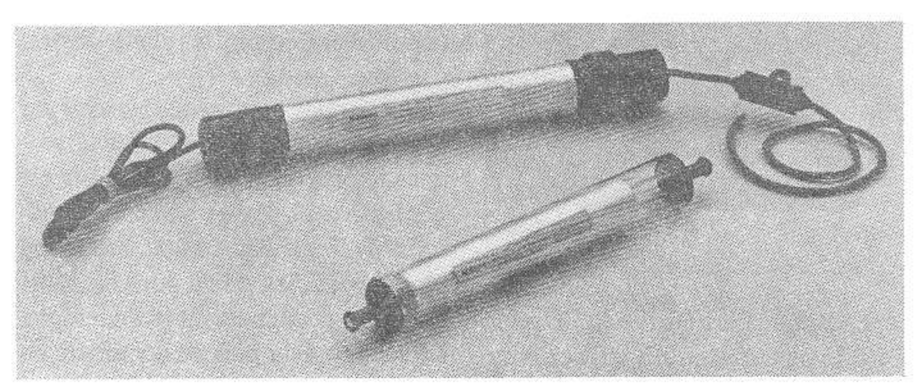
Il doit être compris que ces examens ne pourront qu'établir l'existence d'un dommage soit en vue d'une compensation (invalidité) soit dans un but épidémiologique.

La norme CEI 825 mentionne encore la possibilité d'examens ophtalmiques de routine pour les travailleurs exposés à des lasers de classe 3B et 4. La fréquence de ces examens n'est pas précisée. Winburn (1984) propose un examen tous les 3 ans.

L'examen médical préconisé consiste en
1. un test d'acuité visuelle et un examen des surfaces extérieures de l'oeil quelle que soit la longueur d'onde de l'appareil
2. un examen de fond de l'oeil uniquement dans le cas de lasers de longueur d'onde comprise entre 400 et1400 nm (domain focalisable).

En ce qui concerne les contre-indications, bien qu'aucune recommandaton n'ait été formulée de manière définitive, il paraît logique de préserver toute personne souffrant d'affections du système oculaire ou d'autres affections prédisposant aux troubles oculaires (diabète, hypertension, ...). De même, la personne ne possédant plus qu'un oeil ou n'utilisant essentiellement qu'un oeil doit être écartée.

On peut estimer également (étant donné le faible nombre de sujets à sélectionner) que doivent être écartés tous les sujets susceptibles de présenter des troubles du comportement soit d'origine physique ou d'origine psychique. Le travail sur appareil laser serait à considérer comme un poste de sécurité.



Appareil HeNe courant. On note la petite taille de l'appareil qui apparaît comme exempt de risques.

13. Réglementation Belge

Il n'existe aucune prescription technique spécifique aux appareils laser, reprise au RGPT.
Cependant, celui-ci comprend toute une série d'articles applicables directement ou indirectement.

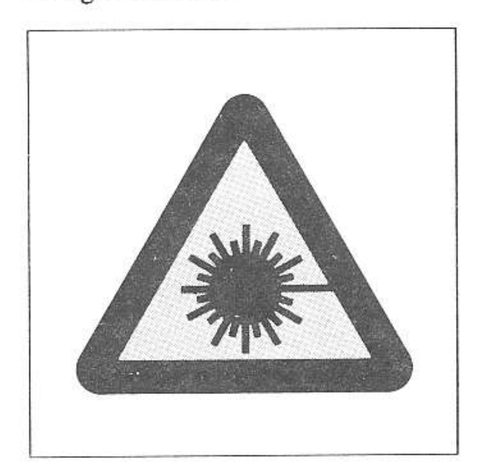
1. Article 54quater, Politique de prévention requérant l'entreprise de prévenir tout risque lié à quelqu'installation que ce soit
- à la commande
- à l'installation
- à la mise en oeuvre surtout (formation du personnel).

2. Le Règlement Général des Installations Electriques pour les aspects électriques de l'installation.

3. Les articles concernant les «radiations nuisibles» (art. 40) et prévoyant l'usage d'écrans, de grillages et de tous dispositifs appropriés.

4. Les articles concernant les sources de radiation IR ou donnant lieu à un rayonnement calorifique important et prévoyant des écrans ou lunettes de protection avec verres «appropriés».

5. L'ensemble des articles concernant la protection des travailleurs contre les agents nocifs.



Cependant, l'article 54quinquies décrit le pictogramme à utiliser pour l'indication des sources et des zones d'utilisation.

D'autre part, un examen médical annuel des yeux est prévu (article 124, annexe II) sans indication de durée minimale d'exposition et donc pour tout travailleur exposé au rayonnement.
Comme on l'a vu, la stipulation d'une durée d'exposition n'aurait aucun sens.

Des exigences spécifiques aux appareils laser peuvent être trouvées dans
- la norme NBN C79-700 en ce qui concerne essentiellement l'installation électrique
- la norme NBN SO6-005 pour les filtres et protecteurs de l'oeil
- la norme NBN SO6-006 pour les lunettes de protection pour les travaux de réglage.

14. Conclusions

Les risques sont potentiellement très graves avec non seulement les appareils de puissance (CO2, YAG, ...) mais également des appareils qui, de par leur taille, leur emploi et leur puisance peuvent paraître dérisoires. Ces risques sont à éviter par des mesures techniques à la source et dans la zone de travail, et par des mesures organisationnelles (formation, organisation...). Une surveillance médicale n'a guère d'utilité du point de vue prévention, le dommage n'étant pas cumulatif.
Les moyens de protection individuelle ne sont qu'un pis-aller. Leur sélection s'avère être difficile et requérir une parfaite connaissance des caractéristiques de l'appareil et des conditions d'emploi les plus néfastes.

La prévention commence bien sûr par la sélection d'un laser de caractéristiques appropriées à la tâche. Cela est généralement réalisé pour les appareils de puissance, mais beaucoup plus superficiellement pour de petits appareils d'alignement par exemple. La section 4 du présent document en souligne pourtant la nécessité et aidera peut-être à conduire cette sélection.

Références bibliographiques générales de base

1. AIB, Application industrielle des lasers. Documentation de sécurité, 1984.

2. BENOIT P., Les lasers et leurs applications. Revue Technique APAVE, n° 224, 1983,53-59.

3. CLEUET A. et MAYER A., Risques liés à l'utilisation industrielle des lasers. Cahiers de notes documentaires, 1974, Note n° 879-74-74.

4. GOLDMAN L., MICHAELSON S.M., ROCKWELL R.J., SLINEY D.H., TENGROTH B.M. and WOLBARSHT M.L., Optical radiation, with particular reference to lasers. In : Laser and optical radiation, WHO 1982, 39-68.

5. JOLY R. et JOLY B., Quoi de nouveau pour les médecins du travail, dans le domaine des techniques laser ? CAMIP, n° 106, 1987, 15-34.

6. QUENZER A., Les lasers - les applications industrielles des lasers de puisance. Revue Technique APAVE, n° 237, 1987, 41-67.

7. SLINEY D. and WOLBARSHT M., Safety with lasers and other optical sources. A comprehensive handbook. Plenum Press, New York and London, August 1985.

8. ULYSSE J.F. et MAYER A., Les lasers, risques et moyens de protection. INRS, ND 1607-125-86, Cahiers de notes documentaires, n° 125, 4ème trimestre 1986.

9. WINBURN D.C., Guideline protects laser users. National Safety News, May 1984, 51-54.

10. NBN C79-700 : Sécurité électrique des appareils et installations laser, 1977.

11. NBN SO6-005 : Filtres et protecteurs de l'oeil contre les rayonnements laser, 1985.

12. NBN SO6-006 : Lunettes de réglage pour laser, 1985.

13. CEI 825 : Sécurité du rayonnement des appareils à laser, classification des matériels, prescriptions et guide de l'utilisateur, 1984.